

옥외 소음의 전파: 음 추적 알고리즘

Outdoor Noise Propagation: Geometry Based Algorithm

박 지 현*, 김 정 태**
(Jihun Park*, Jeungtae Kim**)

* 홍익대학교 컴퓨터 공학과, ** 홍익대학교 기계공학과

(접수일자: 2001년 6월 29일; 수정일자: 2002년 2월 19일; 채택일자: 2002년 4월 10일)

본 논문은 3차원으로 표현된 가상의 옥외 공간에서 소음이 전파되는 방법을 컴퓨터로 시뮬레이션하기 위한 방법을 제시한다. 소음은 음원에서 발생하여 수음자로 직접전파 혹은 많은 반사를 거쳐서 간접적으로 전파되기도 한다. 결과적으로 수음자에 들리는 소음은 음원과 수음자 사이의 최단 거리, 반사 거리, 반사횟수 등에 따라 영향을 받으며, 반사시키는 물체의 특성 및 주파수에 따라서 전달되는 양의 차이가 있을 수 있다. 본 논문에서는 음원에서 수음자에 전달되는 소리를 추적함에 있어서 정방향 추적 (forward tracing)을 사용하는 방법에 대한 문제점들을 제시하고, 다른 접근방법인 기하학적 계산에 의한 시뮬레이션 방법을 제시한다. 즉 소리 추적벡터 (tracing vector)를 정의함에 있어서 음원에서 발생하는 소리벡터를 추적하는 정방향 추적 및 음원과 수음자간 발생가능한 전파 경로를 기하학적으로 계산하는 기하학적 추적 방법에 의한 시뮬레이션 방법을 제시한다. 기하학적 계산 방법은 정방향 추적을 사용하는 경우와 비교할 때 불필요하게 버려지는 추적벡터의 수를 현저히 줄일 수 있으므로 효과적이라고 할 수 있다. 실험결과를 가상현실 모델링 언어 (VRML: Virtual Reality Modeling Language)로 가시화해서 보다 명확하게 알아볼 수 있다. 본 방법은 3차원 가상현실 (virtual reality)이나 멀티미디어 (multimedia), 또는 실내, 실외 등의 소음측정 시뮬레이션에도 적용이 가능하므로 확장성이 좋다고 할 수 있다.

핵심용어: 정 방향 광선추적, VRML, 기하학, 충돌감지

투고분야: 소음 및 공력음향 분야 (10.4)

This paper presents a method to simulate noise propagation by a computer for outdoor environment. Sound propagated in 3 dimensional space generates reflected waves whenever it hits boundary surfaces. If a receiver is away from a sound source, it receives multiple sound waves which are reflected from various boundary surfaces in space. The algorithm being developed in this paper is based on a ray sound theory. If we get 3 dimensional geometry input as well as sound sources, we can compute sound effects all over the boundary surfaces. In this paper, we present two approaches to compute sound: the first approach, called forward tracing, traces sounds forwards from sound sources, while the second approach, called geometry based computation, computes possible propagation routes between sources and receivers. We compare two approaches and suggest the geometry based sound computation for outdoor simulation. Also this approach is very efficient in the sense we can save computational time compared to the forward sound tracing. Sound due to impulse-response is governed by physical environments. When a sound source waveform and numerically computed impulse in time is convoluted, the result generates a synthetic sound. This technique can be easily generalized to synthesize realistic stereo sounds for virtual reality, while the simulation result is visualized using VRML.

Keywords: Forward ray tracing, VRML, Geometry, Collision detection

ASK subject classification: Noise and aeroacoustics (10, 4)

I. 서론

소리는 전파될 때 매개물의 밀도가 달라질 때 굴절, 반사 및 회절 현상이 나타난다. 본 논문에서는 음원에서 일정한 방향으로 소음 벡터를 쏘아서, 그들을 따라가는 정방향 추적법과 음원과 수음자 사이의 기하학적인 관계를 계산하여 직접 및 반사에 의한 간접 전파를 계산하는 방법으로 음원이 수음자에 미치는 영향을 계산하는 기하학적인 방법에 관한 개발이다.

육의 지형을 가상으로 만들기 위하여 삼차원 지형을 프랙탈(fractal)을 사용하여 임의로 제작하였으며, 제작된 임의의 삼차원 지형 혹은 실내(방) 등에 대하여 전파 시뮬레이션을 위한 알고리즘 개발 및 구현을 하였다. 이러한 가상의 지형은 실측 정보를 기초로 한 삼차원 파일(예를 들어 AutoCAD의 dxf 혹은 dwg 화일)로 쉽게 대체될 수 있다. 단 일반적으로 쉽게 구할 수 있는 삼차원 파일들은 표면을 작은 크기의 삼각형으로 나누는 등의 수음자들을 위한 작은 영역으로 바꾸는 작업이 필요하다. 그림 1은 변수를 사용하여 조정된 가상의 삼차원 지형을 보여주며, 정밀도 또한 임의로 조정이 가능하다. 그림 1의 평평한 지표 및 굴곡이 심한 2 개의 지표에 대하여 본 논문에서는 정방향 및 기하학적 계산법을 사용한 시뮬레이션을 한다.

정 방향 광선추적을 통한 시뮬레이션은 계산 시간이 빨라질 수 있으나, 빠뜨리는 표면이 쉽게 발생할 수 있어서 시뮬레이션의 질이 떨어지며 목표 지점과의 거리에 따라 발생하는 추적 벡터의 개수를 조절하여야 한다. 아주 많은 광선을 쏘 경우 계산 시간 역시 많이 걸리게 된다.

역 방향 추적 방법은 수음자에서 추적 벡터를 쏘아 소리를 추적하는 방법이다. 이 방법의 단점은 하나의 표면을 나타내는 삼각형에 대하여 하나의 수음자를 두어야 한다는 것이며, 결국 엄청난 개수의 추적 벡터를 발산하게 된다. 이것이 방법의 단점이 되며 장점은 상당히 정확한 추적 결과를 얻을 수 있으며, 한정된 공간으로 구성된 실내의 추적 등에 사용하면 보다 효과적이다.

기하학을 사용한 시뮬레이션은 음원과 수음자 및 주위 환경에서 1번 2번 등 제한된 횟수로 반사하여 도달할 수 있는 가능성만 따진다. 1번 반사만 허용할 경우 빠른 시간에 계산이 가능하고 실외 환경일 경우 계산 질도 만족스러운 정도이나, 실내 환경 등 여러 번 반사가 필요한 환경을 위한 시뮬레이션의 질은 역 방향 광선 추적보다 뒤떨어지는 것을 발견하였다. 본 논문에서는 정방향 및 기하학적 추적법을 중심으로 설명한다.

II. 관련 연구

전파와 소리는 밀접한 연관관계를 가지고 있다. 본 논문에서는 주파수 대역별로 소리와 전파를 구별하고자 한다. 소음 진동학에서의 소리 추적 및 계산법은 일반적으로 음원부터 시작하여 수음자까지 추적하여 나가는 정방향 추적 법이다. 이 방법에 의하면 필요없는 소리 파를 추적하게 되어 계산시간을 낭비하거나, 혹은 음원에서 아무리 많은 추적을 하더라도 빠뜨리게 되는 수음자가 있으므로 수음자 입장에서 볼 때, 정확한 추적이 되지 않

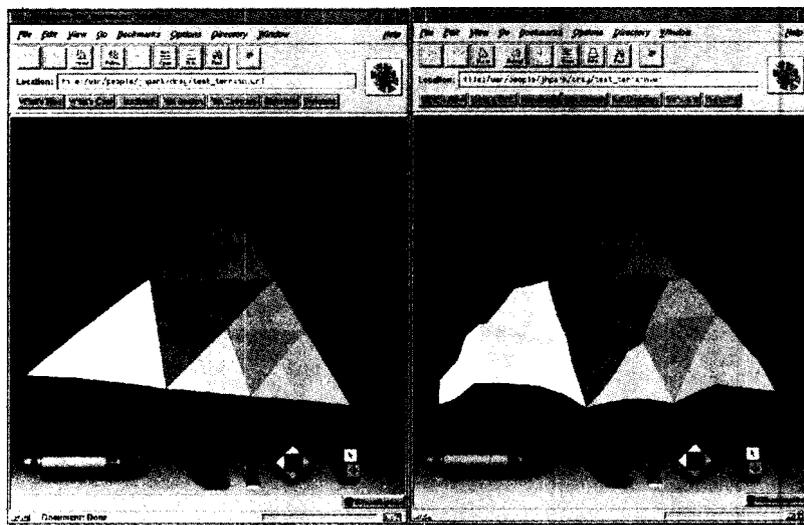


그림 1. 프랙탈로 만들어진 삼차원 지표면 (평평한 것과 굴곡이 많이진 것)
Fig. 1. Fractal generated three dimensional terrain (flat and wavy).

을 수 있다.

컴퓨터를 사용한 시뮬레이션은 전파에 관한 논문에서 찾을 수 있으므로, 이들을 먼저 살펴보기로 한다. [1]번 논문은 전파 기지국과 수신기 사이의 직접 혹은 1번만 반사된 간접 전파 전달을 계산하는데, 이 결점으로 인하여 여러 번 반사될 경우에 대하여 고려하지 못한다. 본 논문에서 제안한 기하학적인 계산법과 유사하리라 추정되나, 자세한 알고리즘은 나타나 있지 않다. 본 저자들은 실내 환경 등 여러 번 반사가 필요한 계산을 위해서는 역 방향 추적 법을 제시한다. [2,3] 논문은 역방향 추적을 사용하는 3차원 광선 추적 기법[4]을 사용하고 있으나, 송신자와 수신자가 각각 1개일 경우만 전파 세기 예측을 할 수 있는 시스템이며, 본 저자들은 무한대의 수신자에 대하여 전파 세기를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. [5] 논문은 2차원 광선 추적 기법을 사용하여 삼각형 분할을 사용하여 빠른 전파 전달 예측을 할 수 있는 기법에 관한 논문이며, [6] 논문은 칼등 형태의 모서리 (knife-edge) 회절에 대한 2차원 광선 추적 기법을 사용한 논문이며, 본 연구의 후속 연구에서 보다 일반적인 경우에 대하여 연구할 계획이며, [1-3,5,6] 논문들은 전파 송신 예측 기능을 가진 소프트웨어 개발에 중점을 둔 반면, [7] 논문은 이러한 소프트웨어를 소개하고 현장 실험결과와 비교 분석한다.

덴마크 공과대학에서는 ODEON[8]이라는 프로그램을 개발하여 주로 단축된 실내 공간에 적용하고 있다. 그리고 상용 패키지로 많이 활용되고 있는 것으로는 RAYNOISE[9]가 있으며, RAYNOISE는 광선 추적의 기본 원리인 입사와 반사각을 계산하여 실내 전파 계산에 사용한다. 본 논문은 ODEON 및 RAYNOISE와 유사하나 실외공간을 위한 소음계산 프로그램의 개발에 관한 것이다.

III. 전파 경로 추적 방법

3.1. 소리 전파 경로 추적 방법

소리 전파 경로 추적 방법은 그 벡터들을 각각 추적해 나간 후에 그 결과를 모아서 가시화 (visualization)/시뮬레이션을 함으로써 전파된 상태를 알아낼 수 있다. 경로 추적 방법에는 정 방향 추적 방법과 역 방향 추적 방법, 혹은 기하학적인 추적 방법이 있다. 역 방향 추적 방법이 정 방향 추적 방법에 비해서 벡터를 계산할 때 필요없는 계산을 줄일 수 있는 장점이 있으나 계산 시간은 많이 소요될 수 있다. 모든 계산에 있어서 직접적인 전파와 간접적인 전파로 인한 거리를 계산한다. 여기서 계산된 거리는 전파 식에 입력되어져서 상응하는 전파 세기를 계산하게 된다.

정 방향 광선추적을 통한 시뮬레이션은 계산 시간은 빨라질 수 있으나, 빠뜨리는 표면이 쉽게 발생할 수 있어서 시뮬레이션의 질이 떨어지며 목표 지점과의 거리에 따라 에러가 발생할 수 있으므로, 생성하는 추적 벡터의 개수를 조절하는 등 다른 조치가 필요하다. 또한 아주 많은 개수의 광선을 쏠 경우 계산 시간 역시 많이 걸리게 된다.

기하학을 사용한 시뮬레이션은 송신기와 수신기 및 주위환경에서 1번 (혹은 2번 등) 반사하여 도달할 수 있는 가능성만 따진다. 상대적으로 빠른 시간에 계산이 가능하고 계산 질도 옥외에서는 만족스러운 정도이나 실내 환경에서의 시뮬레이션의 질은 역 방향 광선 추적보다 뒤떨어지는 것을 발견하였다.

3.2. 정 방향 추적 법

정 방향 추적은 소음 원에서부터 일정한 방향으로 음선 (ray)을 쏘아서 음선을 따라간다. 그림 2는 음원에서 소리

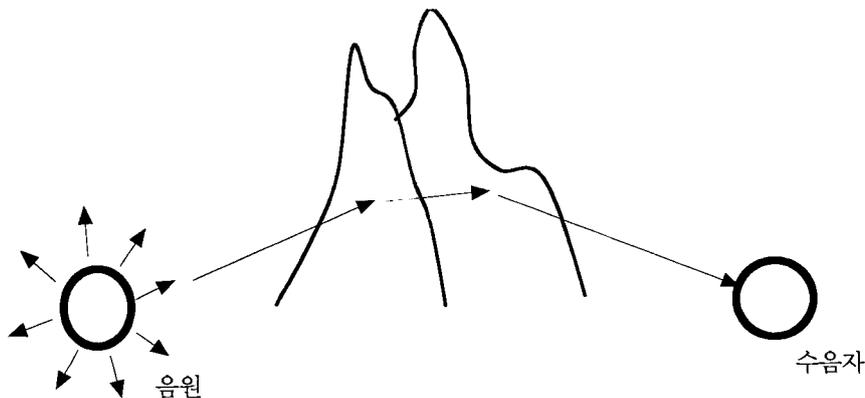


그림 2. 정방향 추적방법
Fig. 2. Forward ray tracing.

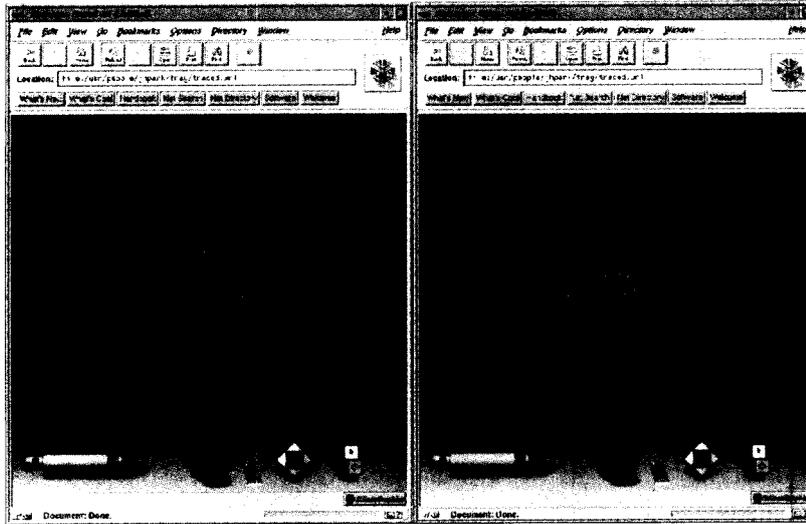


그림 3. 정방향 소리 추적
Fig. 3. Forward sound tracing.

벡터를 추적하는 과정을 나타낸 것이고, 그림 3은 논문의 뒷부분에서 설명될 정방향 추적법을 사용하여 지표면에 소리를 추적한 결과이다. 음선이 표면에 반사되면 반사되는 음선을 계속 추적하며 (소리의 진동이 전달되는 것을 투과로 표현한다면 단 옥외의 전파에 있어서는 투과는 전혀 없는 것으로 처리하였다.) 투과될 경우 투과된 음선 또한 따라가는 방법이다. 이러한 방법을 사용할 경우, 음선은 반사/투과를 거치면서 세기가 약해지게 된다. 일정한 세기 이하로 약해지면 더 이상 추적하지 않는다. 반사되는 음선의 방향은 입사각과 반사각이 같도록 결정되며 투과되는 음선의 방향은 굴절율을 계산하여 결정하며, 하나의 음선에 대하여 물체 표면 충돌시 반사 및 투과가 일어날 경우 무수히 많은 음선들이 발생한다. 주위 환경의 표현은 삼차원 다각형들을 사용하는데 다각형에는 기하학 정보 외에 표면 특성에 대한 정보를 포함한다. 주위 환경을 나타내는 다각형의 수직 방향으로 1.5 m 떨어진 위치에 소음을 수음하는 수음자가 위치한다. 표면 특성의 정보는 반사율 및 투과율 정보를 포함한다. 이러한 음선들은 주위 환경으로 표현된 물체에 소음의 세기 정보를 제공할 수 있게 되며 각각의 음선으로부터 세기 정보를 모아서 합하면 한 표면의 세기로 결정할 수 있다.

이 방법은 음원에서부터 소리의 전파를 시뮬레이션 해 나가는 방법이다. 이를 위하여 음원을 시작으로 하여 음선을 의미하는 벡터를 쓰고 이를 추적한다. 벡터를 쓰는 방법은 음원을 하나의 구로 간주하고 구의 표면을 동일한 면적을 가진 구 표면영역들로 분리한다. 각각의 구 표면

영역의 중심에 해당하는 지점을 찾아내어 음원의 중심 (구의 중심)에서 영역의 중심으로 벡터를 쏜다. 이 벡터가 하나의 영역을 대표하는 음선을 의미하게 되는 것이다. 추적 음선 벡터 생성 방법은 후에 자세히 설명한다. 정방향 추적 방법의 문제점은 음선을 의미하는 벡터의 개수를 생성하는데 있다. 벡터의 개수가 많으면 보다 정확한 소리 추적이 가능할 수 있다. 그러나 엄청난 개수의 벡터 추적으로 인하여 아주 많은 계산 시간이 소요될 뿐만 아니라, 아무리 많은 벡터를 쏘아도 맞추지 못하는 표면이 있을 수 있다. 즉 이러한 표면에 대한 정보는 소리가 도달하지 못하는 지역에 있는 것인지 아니면 소음원에서부터 발사한 벡터 개수가 부족한 이유인지 쉽게 결정을 내리지 못한다. 이러한 치명적인 문제점을 극복하기 위하여 음원과 지표면과 거리 및 지표면을 나타내는 다각형의 크기를 고려하여 추적용 음원 개수를 결정할 수 있겠으나, 발생 가능한 문제를 완벽히 해결하지 못하므로 바람직한 접근 방법은 아니라고 본다. 그림 3은 정방향 추적법을 사용하여 소리의 전파를 시뮬레이션한 결과이다. 그림에서 보면 음원에서 쏜 추적 벡터의 개수가 한정적이므로 지표면에 등근 띠 모양으로 벡터와 충돌한 면이 표시난다. 즉 벡터가 도달하지 못한 표면에 대한 정보는 실제 소리가 안들렸는지 혹은 음원에서 추적한 벡터의 개수가 미흡했는지 분명하지 않다. 이러한 것은 정방향 추적의 최대 단점이 된다. 다음은 정방향 추적법을 사용한 전파 추적 알고리즘을 나타낸다.

정방향추적 알고리즘

loop_1: 음원을 나타내는 구의 위도상으로 n번 분할에 대한 반복
 loop_2: 구의 경도상으로 2n 개로 분할에 대한 반복
 구 표면상 하나의 영역에 대한 표면 중심점 계산;
 추적벡터 = 표면 중심점 - 구 중심;
 추적벡터와 주위지형 표현 다각형과의 교차계산;
 loop_2_끝
 loop_1_끝

함수 교차계산은 추적벡터를 입력으로 받으며 재귀함수이다. 즉 추적 벡터를 계속 쏘아가며 주위 환경과의 충돌을 계산하며 다음과 같다.

교차계산 (추적벡터를 입력으로 받음)

- 모든 다각형에 대하여 제일 가까운 다각형 찾음.
- 만약 못 찾았으면 return;
- 충돌한 다각형 알아냄. 충돌지점 계산;
- 충돌한 다각형의 정보 기록 난에 충돌지점 세기. 위치 저장;
- 반사벡터 계산;
- 표면 특성 고려한 반사벡터 세기 결정;
- 투과벡터 계산;
- 표면 특성 고려한 투과벡터 세기 결정;
- 반사벡터와 주위지형 표현 다각형과의 교차계산;
- 투과벡터와 주위지형 표현 다각형과의 교차계산;

이러한 계산이 종료된 후에 주위 환경을 나타내는 각각의 다각형들에 저장된 모든 충돌 정보를 합하면 각각의 다각형에서 받는 소리 세기가 계산된다. 충돌 정보는 추후의 정교

한 계산을 위하여 링크드 리스트 (linked list)로 저장된다.

3.3. 기하학적 추적 법

\vec{n} : 반사면의 수직 벡터
 \vec{s}' : 음원의 허상 위치 벡터
 $\vec{n} \cdot \vec{x} = d$: 반사면의 평면 방정식
 $\vec{s}' = \vec{s} + 2 \left(\frac{d - \vec{n} \cdot \vec{s}}{|\vec{n}|} \right) \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|}$
 반사지점 = $\vec{r} + \frac{d - \vec{n} \cdot \vec{r}}{\vec{n} \cdot (\vec{s}' - \vec{r})} (\vec{s}' - \vec{r})$ (1)

시뮬레이션 결과 질을 높이기 위하여 정 방향 추적법의 어려움은 엄청난 계산시간에 있다. 이러한 계산시간 상의 어려움을 보완하기 위하여 기하학적인 계산 방법을 개발하였다. 이 방법에서는 음원과 수음자 사이에는 직접적인 전파와 1회 혹은 2회의 제한적인 반사만 존재하는 것으로 가정한다. 즉 이 방법에서는 먼저 음원과 수음자 사이에 직접적인 경로가 있는지 혹은 1회, 2회 등 제한적인 반사를 통한 경로가 있는지 전적으로 기하학적인 수식에 의존하여 계산한다. 그림 4에 1회 반사 그림 5에 2회 반사를 사용한 계산 방법이 나타나 있다. 물론 필요에 따라 반사 횟수를 늘일 수 있는 계산식도 유도 가능할 것이나 계산 시간 증대로 연결된다. 이 방법은 방향과는 전혀 무관한 방법이다. 반사 횟수에 대한 제한이 높은 주파수 대역별에 따른 소리의 전파 특성에 따라 무리일 수 있으나, 주파수가 아주 높지 않은 경우에는 큰 무리없이 받아들일 수 있다고 가정한 것이다. 이를 위하여 음원과 수음자 사이의 반사지점을 계산하는 식을 개발하였다. 그림 4, 5는 소리가 1번, 2번 반사될 경우 소리 추적을 위한 수식을 유도하는 절차를 나타낸 그림이다. 여기서 각각의 음원/수음자에서는 반사가 가능한 임의의 벽면을 기

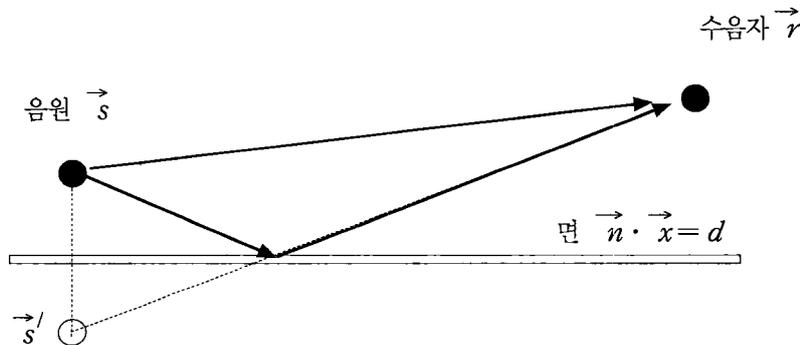


그림 4. 기하학을 사용한 소리의 전파계산 (1번 반사)
 Fig. 4. Propagation computation based on geometry (1 reflection).

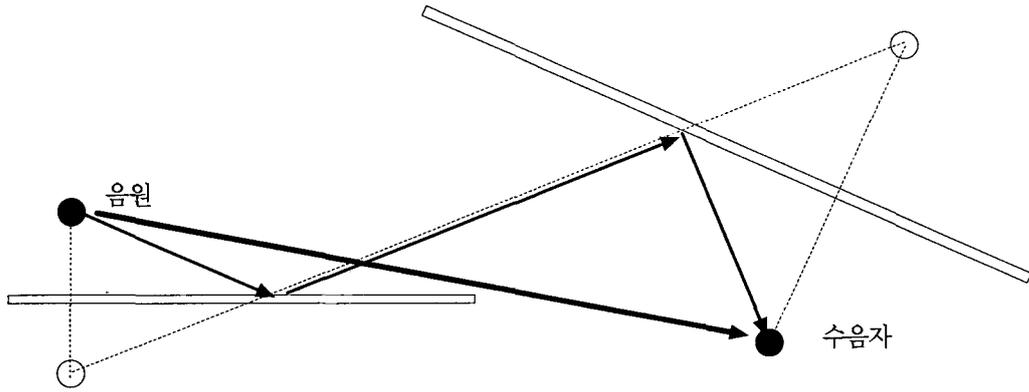


그림 5. 기하학을 사용한 소리의 전파계산 (2번 반사)
 Fig. 5. Propagation computation based on geometry (2 reflections).

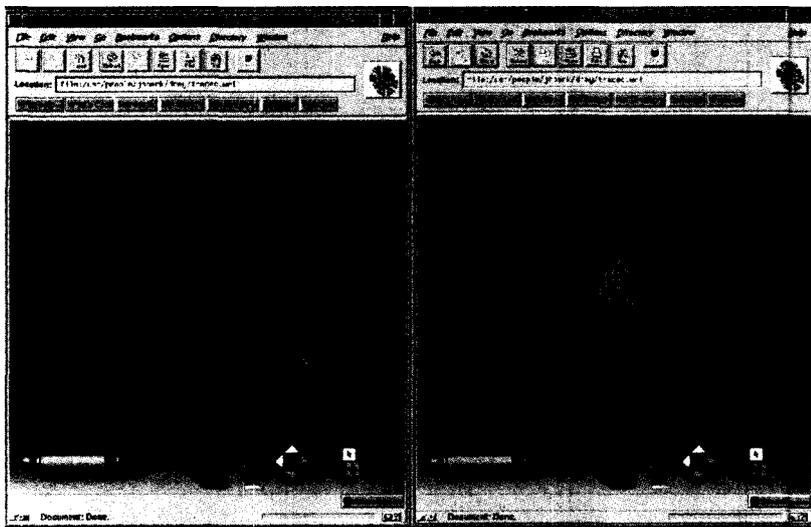


그림 6. 기하학을 기반한 소리의 전파계산
 Fig. 6. Geometry based sound propagation computation.

준으로 허상을 만든다. 두 개의 허상을 연결하면 각각의 벽면과 만나는 지점들이 반사지점이 된다. 이러한 방법에서 삼각형으로 이루어진 벽면의 개수가 m 이고, 한 개의 음원이며, 1번 반사일 경우 m^2 번, 2번 반사일 경우 m^3 번의 반사 확인이 필요하다. 물론 계산 횟수를 줄이는 방법도 개발 가능하다. 이 방법의 장점은 실외 환경을 고려한 1번 반사일 경우, 계산 시간이 이때까지 제안된 방법 중 제일 빠르다는 점이다. 다만 여기서 고려하는 반사 횟수는 1번 혹은 2번만 고려하므로, 여러 번 반사되는 경우에 대해서는 적절한 계산법이 되지 못할 것이다. 여러 번 반사를 위한 계산 방법의 수정은 용이하나 계산 시간이 길어진다. 그림 6은 기하학적 반사 경로 추적을 사용하여 소리의 전파를 계산한 결과이다. 이 그림은 그림 3과 좋은 비교가 된다. 그림 3은 정방향 추적을 사용하였으므로 지표면 중에 소음 계산이 안된 부분이 존재할 수 있으나, 그림 6에서는 모든 표면에 대한 소음 계산이 가능하다.

다음은 n 개의 음원에 대하여 기하학적 계산법을 사용한 소리 전파 세기 계산 알고리즘을 나타낸다. 여기서는 1번 반사만을 가정하기로 한다. 2번 반사일 경우, 주 알고리즘의 제일 내부에 모든 물체들에 대한 또 하나의 반복이 필요하다.

기하학적 소리계산

- loop 1: 모든 지표 환경 표현 다각형 m 개에 대하여
- loop 2: n 개 음원에 대하여
 - loop_1의 해당 번째 다각형에 대한 표면 중심점 계산;
 - 수직 벡터 방향으로 중심점 (수음자) 1.5 미터 상 승시킴;
 - 수음자와 음원 사이의 직접 경로 확인;
 - 경로 존재시 경로 길이 저장;

```

/* 수음자에서 음원으로의 1 번 반사 경로 확인 */
loop_3: 모든 지표 다각형 m개에 대하여
    loop_3의 해당 번째 다각형을 경유한 경로가
    존재하는지 확인;
    경로 존재시 반사 경로 길이 저장;
    전파 세기 계산법에 의하여 하나의 수음자에
    대한 세기를 축적해 나감;
loop_3_끝
/* 수음자와 음원 간의 2 번 반사 경로 확인 */
loop_4: 모든 지표 다각형 m개에 대하여
    loop_5: 모든 지표환경 표현 다각형 m개에 대
    하여
        loop_4 및 loop_5의 해당 번째 다각형을 경
        유한 경로 존재하는지 확인;
        경로 존재시 반사 경로 길이 저장;
        전파 세기 계산법에 의하여 하나의 수음자
        에 대한 세기를 축적해 나감;
    loop_5_끝
loop_4_끝
loop_2_끝
loop_1_끝
    
```

3.4. 소리 전파 세기 계산 법

소리의 전파 량은 여러 가지 요소에 의해 영향을 받는다. 온도, 습도, 풍속 그리고, 반사되는 물체의 표면 특성 등 여러 가지가 있다. 소리의 전파 량에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 음원과 수음 점 사이의 거리이다. 기존의 경로 추적 방법을 이용한 시뮬레이션에서는 거리와 물체

의 표면 특성만을 전파 량을 결정하는데 고려했다. 이 두 가지만을 고려해서 시뮬레이션을 해도 결과 값에 그리 큰 오차를 가져오지는 않는다. 그러나 정밀한 음향 효과를 이용해서 좀 더 실감을 느끼기를 원한다면, 과학 실험 결과를 시뮬레이션해야 할 경우에는 정확한 전파 량의 계산이 요구된다.

음원에서 소리가 전파되어 나갈 때 수음 점까지 도달하는 소리가 있고, 다른 곳으로 가는 소리가 있다. 수음 점까지 도달하는 소리는 일반적으로 그림 7과 같은 과정으로 전파되게 된다. 음원에서 직접 수음 점으로 도달하는 소리가 있고 다른 물체에 부딪힌 후에 도달하는 소리가 있다. R 은 음원에서 수음 점까지의 직접적인 거리를 의미하고, r_1 은 반사되기 전까지의 거리 r_2 는 반사된 후 수음 점까지의 거리를 의미한다.

- t : 섭씨온도
- f : 각 옥타브밴드 대역의 중심 주파수
- $\rho_0 c$: 공기의 특성 임피던스 값
- σ : 지표면의 흐름 저항성
- Z_g : 지표면의 임피던스
- R_p : 반사 계수
- θ : 지표면과 반사된 후의 벡터 사이의 각도
- α : 흡음계수 (*absorption coefficient*)
- SPL : 음압레벨 (*sound pressure level*)
- W : 음향강도레벨 (*sound power level*)

라고 두면 음압레벨 (SPL)은 다음의 식으로 계산된다[10-12].

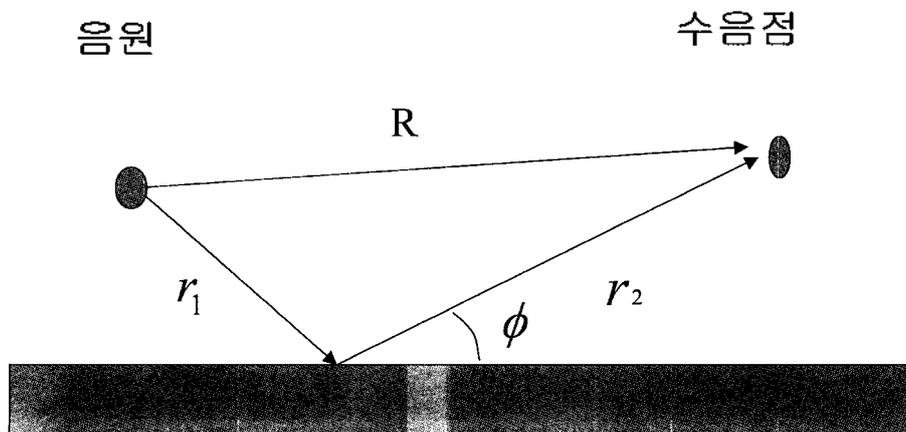


그림 7. 소리의 전파
Fig. 7. Propagation of sound.

$$\rho_0 = 1.24$$

$$c = 331 + 0.6t$$

$$Z_g = \rho_0 c \left[1 + 0.057 \left(-\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.754} - i 0.087 \frac{\rho_0 f}{\sigma}^{-0.732} \right] \quad (2)$$

$$R_p = \frac{\sin \phi - \frac{\rho_0 c}{Z_g}}{\sin \phi + \frac{\rho_0 c}{Z_g}} \quad (3)$$

$$a = 1 - |R_p|^2 \quad (4)$$

$$p^2 = \rho_0 c \frac{W}{4\pi} \left[\frac{1}{R^2} + \frac{1-a}{(r_1 + r_2)^2} \right] \quad (5)$$

$$SPL = 20 \log \frac{p}{(20 \times 10^{-6})} \quad (6)$$

3.5. 주파수 특성을 고려한 경로 추적 방법

소리는 주파수에 따라서 반사율이나 속도의 감소폭 등 특성 값이 달라진다. 소리의 물리적인 현상에 따르면 주파수가 높을수록 음 에너지 전파는 직진하므로 방향성을 가지지만, 주파수가 낮아지면 회절효과가 나타나 “등 방향성”을 지니게 된다. 그러나 본 프로그램 개발에서는 소리의 전파량을 계산할 때 반사계수를 결정하는 임피던스를 새롭게 설정한다. 정확한 시뮬레이션을 위해서는 한 개의 추적 벡터에 대해서도 주파수 별로 다른 특성 값을 이용해서 시뮬레이션을 해야 한다. 본 구현에서는 하나의 지표면에 주파수 대역별로 8개의 임피던스 값을 가지고 있다. 옥타브 밴드의 중심주파수를 사용하여 8가지로 나누어서 8번의 시뮬레이션을 한다.

3.6. 음원 혹은 수음자의 모델링

이 방법은 정방향 추적일 경우 음원 모델링에 사용되는 방법이다. 각각의 음원은 하나의 구로 모델링된다. 여기서 중요한 것은 구의 크기가 아니고 하나의 구를 몇 개의 영역으로 나눌 것인가이다. 각 영역의 중심과 구의 중심을 잇는 벡터가 전파 원 혹은 수신 원에서 쏘는 여러 개의 벡터 중 하나로 표현된다. 수학적으로 하나의 구를 여러 개의 영역으로 나누되 위에서 언급된 모든 인접한 영역을 표현하는 벡터간의 내각이 동일하게 만드는 것은 몇몇의 특별한 경우를 제외하고 불가능하다.

다음에서는 구에 대해 동일한 면적을 갖도록 영역을 나누는 방법을 개발한다. 이 방법에서는 인접한 영역을 표현하는 벡터끼리의 내각이 일정하지는 않다. 그러나

이 방법에서는 임의의 구 표면을 경도 상으로는 2n개 위도 상으로는 n개의 영역으로 총 2n²개로 나눈다. 그림 8은 반지름이 r인 하나의 구를 경도 (φ)/위도 (θ)상으로 나누는 것을 나타낸다.

그림 8-10에서는 구 표면 상 하나의 영역을 나타내기 위한 설정이다. 여기서 위도 상으로는 각도 (θ₂-θ₁) 크기이고 길이는 rdθ, 일정한 크기의 n개로 분리하며 rcosθ dφ의 길이를 가진다. 이것은 각 대표 영역이 동일한 면적을 유지하기 위하여, 위도 상 높이에 따라 밑변/윗변의 길이가 달라지기 때문이다. 이러한 경우에 대하여 면적을 계산하면 구 표면의 총 면적은 4πr²이고, 경도 상 φ도일 때 하나의 영역에 대한 면적은 r²dφ(sinθ₂-sinθ₁)이며 위도 상 구 표면의 한 영역을 대표하는 각도는 α이다. 식 (10)은 대표 각도 α를 계산하기 위한 식이

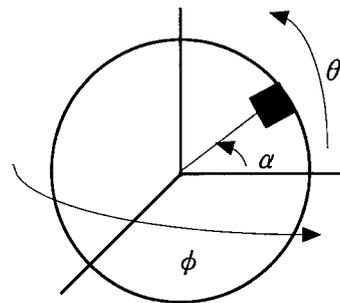


그림 8. 음원/수음자 모델링
Fig. 8. Sound source/Receiver modeling.

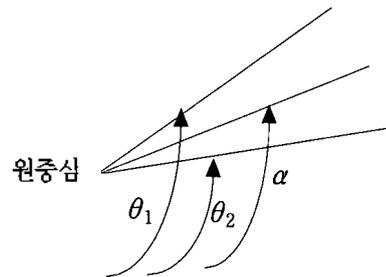


그림 9. 구표면상의 하나의 대표 영역을 설정하기 위한 각
Fig. 9. Angles to define a segmented area on a sphere.

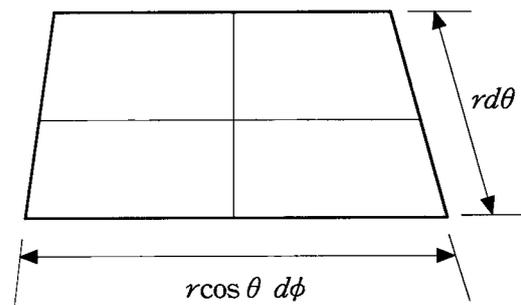


그림 10. 구표면상의 하나의 대표 영역
Fig. 10. Segmented area on a sphere.

며, 이것이 계산되면 정방향 추적법에 있어서 음원에서 α 를 기준으로 추적 벡터를 쓸 수 있다.

$$\int_{\phi=0}^{\phi=360} \int_{\theta=-90}^{\theta=90} r^2 \cos \theta \, d\theta \, d\phi = 4 \pi r^2 \quad (7)$$

$$\int_{\phi=0}^{\phi=360} \int_{\theta_1}^{\theta_2} r^2 \cos \theta \, d\theta \, d\phi = r^2 \phi (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \quad (8)$$

$$r^2 \phi (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) = 2r^2 \phi (\sin \alpha - \sin \theta_1) \quad (9)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{1}{2} (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \right) \quad (10)$$

3.7. 삼차원 지표면 생성

삼차원 지표면은 프렉탈을 사용하여 생성하였다. 이를 위하여 하나의 삼각형을 4개의 작은 삼각형으로 분할하는 방법을 사용하였으며, 삼각형의 세 변의 중심을 각각 임의 숫자 생성기 (random number generator)를 사용하여 삼각형의 수직 벡터를 기준으로 하여 변화를 가한다. 즉 하나의 삼각형 모서리를 만드는 선분은 삼각형 수직 벡터에 평행하고 선분에 수직인 방향으로 변화를 가하여 새로운 지점을 만든다. 이렇게 추가되는 점 3개는 새로운 4개의 삼각형을 만드는 데 사용되어진다. 이렇게 변화를 가하여 만들어진 4개의 삼각형 각각에 대하여 4개의 작은 삼각형으로 분할하는 방법을 재귀적 방법을 사용하여 수행하였다. 삼각형 생성에 관한 계통적 정보는 상세 정도를 고려한 브라우징 (LOD browsing)을 위하여 저장된다. 험한 산 혹은 완만한 산 등은 파라미터를 사용하여 조정하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 서로 다른 두 가지의 다른 음선 추적 방법을 제시 및 관찰하였다. 정 방향 추적 법은 아무리 많은 개수의 추적 벡터를 발산하여도 맞을 수 있음에도 불구하고 맞추지 못하는 삼각형이 있을 수 있다. 이러한 이유는 소음 원에 대한 모델링이 완벽하지 못하기 때문이며, 더 좋은 방법이 존재하겠지만 상당한 계산 시간이 소요될 것이다. 이를 보완하기 위하여 거리에 따라 발산하는 추적 벡터의 수를 조절할 수 있겠으나 완벽한 대안은 되지 못한다.

본 논문에서 채택한 추적 방법은 기하학적으로 추적하는 방법인데 이 방법은 빠르게 추적할 수 있으나, 허용되는 반사의 횟수가 제한적이므로 야외 등 전파 반사 회수가 낮은 지역에서 사용하는데 적합할 것이다. 그림 3과 그림 6에서는 하나는 평평하고 다른 하나는 굴곡이 매우

심한 그림 1의 2가지의 지표면에 대하여 정방향 추적과 기하학적 소리 전파를 계산하였으며, 그림에서 붉은 수록 소리가 잘 들리는 부분을 나타내고 푸를수록 소리가 잘 들리지 않는 지표면에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 정방향 추적법은 아무리 많은 소리 추적 벡터를 쓰아도 완벽한 시뮬레이션이 불가능하므로 보다 나은 시뮬레이션을 하기 위하여 많은 계산 시간이 요하는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 실외 소음 환경을 위하여 기하학적인 계산 방법을 제안하며 그 근거는 제한된 횟수의 반사만 허용한다는 점이다. 제한된 횟수의 반사 계산만 할 경우, 벡터에 대한 매우 충실한 추적은 필요없다. 이러한 방법을 채택하는 것이 본 논문에서 제안하는 기하학적인 계산방법이다.

그러나 이러한 시뮬레이션 방법들의 공통적인 문제점은 하나의 물체를 표현하는 방법에 따라 결과가 달라질 수 있다는 점이다. 즉 하나의 원통을 생각해 보자. 한쪽 끝에는 소음 원이, 다른 한쪽 끝에는 수음자가 있다고 가정한다. 원통을 표현하는 방법은 아주 많다. 원통을 표현하는데 있어서 중요한 것은 원통을 몇 개의 삼각형으로 나누느냐 하는 것이다. 개수가 많을수록 소음 원에서 수음 자로의 경로는 많아지며, 경로가 많아지면 상대적으로 수음 자에 도달하는 음압도 세어진다. 즉 이러한 삼각형을 사용한 지표면 모델링 및 소리 추적 법에 있어서 지표면을 나타내는 삼각형의 크기를 고려하여 소음의 세기를 계산하는 방법이 강구되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구 (과제번호 2000-2-30400-011-1) 지원에 의해 이루어졌습니다.

참고 문헌

1. C. M. Peter Ho and T. S. Rappaport, "Wireless channel prediction in a modern office building using an image-based ray tracing method," *Proceedings of the Globecom*, 1247-1251, 1993.
2. A. Reinaldo and A. Valenzuela, "Ray tracing approach to predicting indoor wireless transmission," *Proceedings of the 1993 IEEE 43th Vehicular Technology Conference*, 214-218, 1993.
3. S. Naruniranal, Y. Huang and D. Parsons, "A three-dimensional image ray tracing (3D-IRT) method for indoor wireless channel characterization," *Proceedings of the 1999 High Frequency*

Postgraduate Student Colloquium, 62-67, 1999.

4. A. Watt and M. Watt, *Advanced Animation and Rendering Techniques: Theory and Practice*, Addison-Wesley, 219-265, 1992.
5. Z. J. Zhang, Z. Yun and M. F. Iskander, "Ray tracing method for propagation models in wireless communication systems," *Electronics Letters*, **36** (5), 464-465, 2000.
6. H. Mokhtari and P. Lazaridis, "Comparative study of lateral profile knife-edge diffraction and ray tracing technique using GTD in urban environment," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **48** (1), 255-261, 1999.
7. S. C. Kim, S. C. Kim, B. J. Willis III, V. Erceg, S. J. Fortune, R. A. Valenzuela, L. W. Thomas, J. Ling and J. D. Moore, "Radio propagation measurements and prediction using three-dimensional ray tracing in urban environments at 908 MHz and 1.9 GHz," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **48** (3), 931-946, 1999.
8. ODEON, <http://www.dat.dtu.dk/~odeon/OdSound1.htm>.
9. RAYNOISE, <http://www.ingeciber.com/eng/products/default.htm>.
10. M. E. Delany and E. N. Bazley, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials," *Applied Acoustics*, **3**, 105-116, 1970.
11. Y. Miki, "Acoustical properties of porous materials—modification of delany, bazley models," *J. Acoust. Soc. Jpn (E)*, **11**, 19-24,

1990.

12. T. F. W. Embleton, J. E. Piercy and N. Cison, "Outdoors sound propagation over ground of finite impedance," *JSV*, **59** (2), 267-277, 1976.

저자 약력

● 박 지 현 (Jihun Park)



1983년 2월: 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
 1985년 2월: 한국과학기술원 전산학과 (이화사)
 1990년 5월: University of Texas at Austin, Department of Computer Science (MSCS)
 1994년 8월: University of Texas at Austin, Department of Computer Science (Ph.D.)
 1985년 2월 ~ 1986년 2월: ETRI, 망운용연구실, 연구원
 1986년 3월 ~ 1993년 8월: 부산 외국어 대학교, 컴퓨터 공학과, 조교수

1994년 8월 ~ 현재: 홍익대학교 공과대학 컴퓨터공학과 (현) 부교수
 ※ 주관심분야: 컴퓨터 애니메이션, 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 게임, 음향합성

● 김 정 태 (Jeungtae Kim)

한국음향학회지 제20권 제4호 참조